

Лавриненко А.А.,

докт. техн. наук,

зав. лабораторией ИПКОН РАН

СОВРЕМЕННЫЕ ФЛОТАЦИОННЫЕ МАШИНЫ ДЛЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

В настоящее время освоение минерально-сырьевой базы России в возрастающей степени связано с использованием труднообогатимого тонкодисперсного минерального сырья. Основным методом обогащения тонкодисперсных руд сложного вещественного состава является флотация. С ее помощью ежегодно обогащают около 2 млрд т полезных ископаемых, среди которых основное место занимают руды цветных, редких и благородных металлов. Все большее распространение флотационный метод получает также при обогащении железных руд и каменных углей, для которых этот метод не являлся традиционным. Например, на отечественных углеобогащительных фабриках количество шламов, обогащаемых методом пенной флотации, достигает 25-35 % от массы угля, поступающего на переработку.

Вовлечение в переработку все более бедных и труднообогатимых руд приводит к необходимости значительно увеличения производительности обогащительных фабрик (которая уже сейчас достигает 100 тыс. т руды в сутки), использования оборудования высокой единичной мощности, совершенствования технологического процесса.

Как свидетельствует теория и практика флотации, показатели процесса существенно зависят не только от физико-химического состояния объектов и среды разделения, но и от способа аэрации и гидродинамических условий процесса разделения, а также от конструктивных особенностей флотационных машин и аппаратов.

Конструирование флотационных машин идет сегодня по пути применения большеобъемных камер, обеспечивающих снижение капитальных и эксплуатационных затрат. Тенденция их использования особенно усилилась с 90-х годов прошлого столетия (рис. 1), и к настоящему времени вместимость камер возросла до 300–500 м³.

Наряду с созданием большеобъемных машин разрабатываются новые способы и устройства аэрирования пульпы, а также создаются оптимальные гидродинамические условия для процессов минерализации пузырьков и выделения из пульпы флотационных комплексов в камерах меньшего размера.

Многогранность технологических требований осложняет задачу создания надежной конструкции машины для эффективной флотации различного минерального сырья на разных стадиях передела.

Разработку новых флотационных машин проводят, как правило, с соблюдением геометрического подобия элементов конструкции и гидродинамического подобия структуры потоков. Фирмы производители во многих случаях не корректируют конструкции при увеличении размеров импеллерных узлов и камер, а решают проблему инженерно-конструкторскими методами на основе эмпирических подходов. На этом фоне складывается впечатление, что устройство импеллерных блоков машин уже достаточно оптимизировано и следует лишь масштабировать их при переходе к камере большей вместимости. При этом разнообразие типов аэрационных блоков и камер во многом объясняется требованием новизны в патентной классификации.

По способу аэрации пульпы флотационные машины делят на механические, пневмомеханические, пневматические и с понижением давления (напорная, вакуумная). Последние используются в основном при очистке сточных вод и крайне редко — при флотации минералов. Обогащительные фабрики во всем мире оснащены в основном импеллерными машинами — механическими и пневмомеханическими. Между тем в последние 20 лет за рубежом, а затем и в России импеллерные машины все в большей степени заменяют в различных операциях флотации пневматическими колонными (чановыми) машинами.

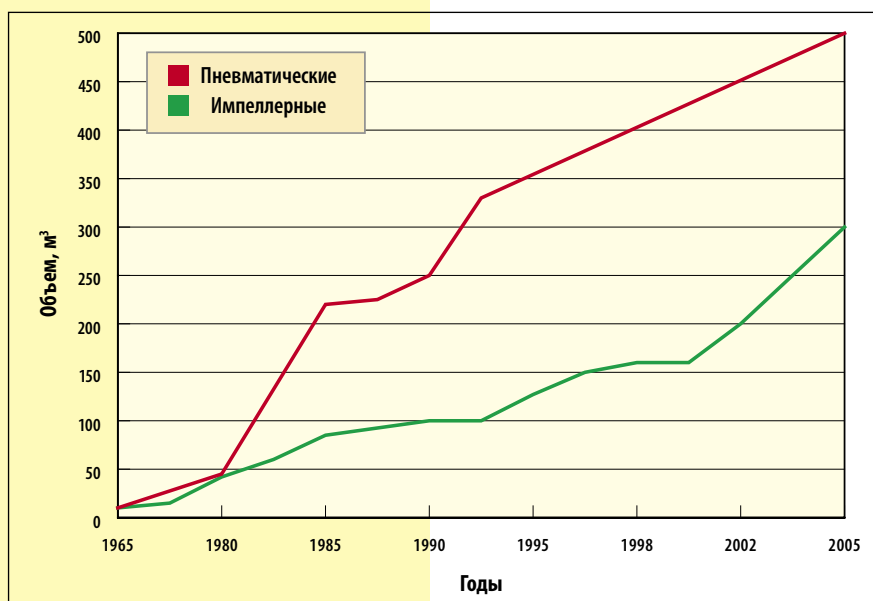


Рис. 1. Рост объемов камер флотации



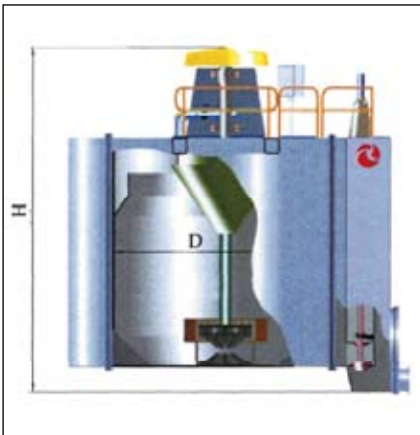
Рис. 2. Аэрационный узел флотомашини ФМ-16УМ

Несмотря на значительное многообразие конструкций флотационных машин практика их применения выявила сравнительно ограниченное число типов машин, обладающих наиболее высокими технико-экономическими и технологическими характеристиками.

Импеллерные флотационные машины

За последние 15–20 лет вместимость импеллерных флотационных машин выросла с 40–70 до 170–300 м³, а диаметр и высота, соответственно, до 7–8 и 5–9 м. Финская фирма Outokumpu Technology (в настоящее время компания Outotec) поставила в Новую Зеландию камеру вместимостью 300 м³ для флотации золотосодержащих руд и планирует использовать такую же камеру для флотации медно-молибденовых руд. Кроме того, фирма предлагает к использованию машины вместимостью до 500 м³.

Как показывает практика флотации, применение большеобъемных камер позволяет существенно снизить удельный расход электроэнергии — на 30–40%. При этом удельная мощность промышленных машин вместимостью 120–200



м³, независимо от их глубины, скорости вращения импеллера и плотности пульпы, практически постоянна и составляет 0,8–1 кВт/м³ (Dorr-Oliver, Outokumpu, RCS). Что касается технологической оценки использования большеобъемных флотомашин, мнения специалистов расходятся. В лучшем случае признается, что показатели обогащения на пневмомеханических флотомашинах разной вместимости равнозначны. При этом необходимый удельный воздушный поток в крупногабаритных камерах уменьшился почти вдвое.

До сих пор нет однозначного мнения о предпочтительности машин механического или пневмомеханического типа, хотя последние отличаются более высокой скоростью флотации (в среднем на 30%) и возможностью подачи

гетических затрат за счет установки эффективного аэрационного узла.

Практически на обогатительных фабриках наиболее широко применяют не более десяти типов флотационных машин. За рубежом это машины фирм Outokumpu, Wemko, Denver, Dorr-Oliver, в России и странах СНГ — машины типа ФМ, ФПМ, РИФ, Механобр и некоторые другие. В России широко применяемые ранее машины Механобр заменяют в основном на машины ОАО «ПО Усольмаш» и НПО «РИВС». В калийной отрасли используют машины, разработанные в институтах ГИГХС (Государственный научно-исследовательский институт горнохимического сырья) и МГОУ (Московский государственный открытый университет).

Флотационными машинами ОАО «ПО Усольмаш» типа ФМ и ФПМ оснащены бо-

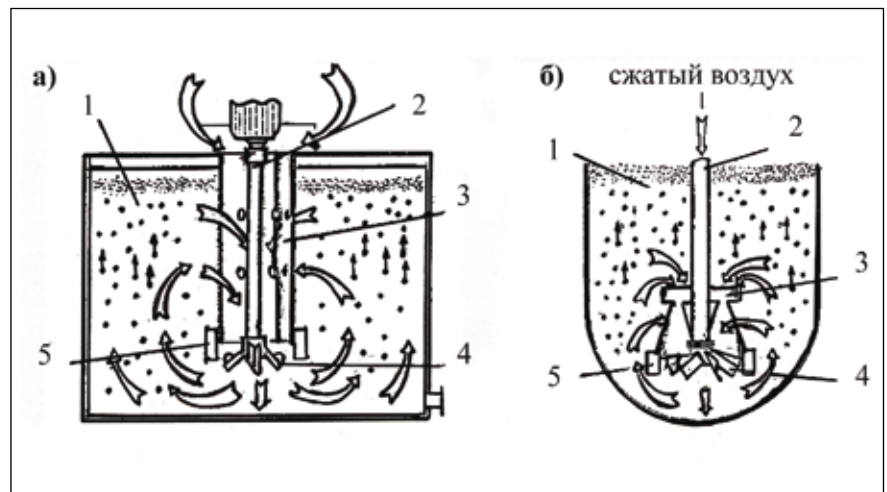


Рис. 4. Принципиальные схемы флотационных машин с осевыми импеллерами: а — механической прямоприводной, б — пневмомеханической
1 — камера, 2 — вал, 3 — циркуляционный стакан, 4 — импеллер, 5 — статор

в пульпу большого количества воздуха. По-видимому, только масштабные сравнительные испытания, проведенные в идентичных условиях, позволят сделать объективные выводы и то лишь для конкретных типов руд и операций флотации.

В последнее время возросла доля использования пневмомеханических большеобъемных машин (Dorr-Oliver, Outokumpu), хотя некоторые фирмы, например Wemko (США), продолжают выпускать машины с механическим способом аэрирования, разрабатывая новые его решения. Наблюдается и обратный переход — от пневмомеханических камер среднего размера с глубиной до 2,5 м к механическим, с целью снижения энер-

лее 60 обогатительных фабрик и комбинатов. В последние годы в объединении разработано несколько перспективных моделей механических машин, в том числе: ФМ-16Б с широколопастным импеллером и ее усовершенствованный вариант — ФМ-16УМ с решетчатой цилиндрической обечайкой вокруг верхней части ротора над контуром статора (рис. 2). Флотационные машины ФМ-16УМ (24 камеры) поставлены на Норильскую ОФ вместо ФПМ-16, поскольку они имеют более высокие (на 10–15%) технологические показатели.

Из пневмомеханических флотомашин нового поколения можно отметить ФПМ-16УМ с усовершенствованным аэрационным узлом. Флотомашин успешно прошла испытания в операции контрольной медно-молибденовой флотации на фабрике СП «Эрдэнэт» (Монголия) и принята к внедрению. При этом были проведе-

Рис. 3. Флотомашини РИФ

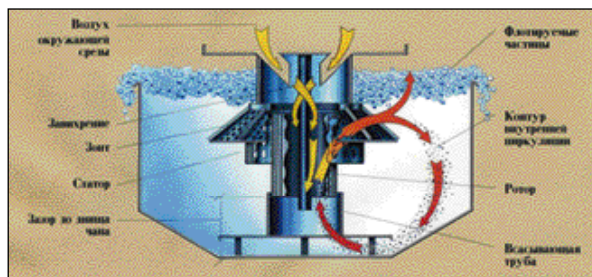


Рис. 5. Флотомашина Wemko SmartCell

ны сравнительные испытания ФПМ-16УМ и РИФ-16 (НПО «РИВС»). Поскольку они проходили в неоднозначных условиях, было сделано лишь обоснованное предположение о лучшей аэрации в машине ФМ-16УМ. Между тем к технологическим преимуществам новой машины можно отнести возможность ее легкого запуска после остановки, несмотря на довольно большую глубину камеры (4,1 м), за счет относительно высокого расположения импеллерного блока и параболической формы днища.

Для обогащения золотосодержащей руды в ОАО «ПО Усольмаш» разработана пневмомеханическая машина с камерой вместимостью 100 м^3 — ФПМ УП-100 и импеллером из полиуретана. На фабрику ЗАО «Полюс» поставлены 16 машин данного типа. Пропускная способность машины по потоку пульпы при содержании твердого 25% составляет $37 \text{ м}^3/\text{мин}$, удельный расход воздуха — $1,18 \text{ м}^3/(\text{мин} \cdot \text{м}^2)$.

НПО «РИВС» (создано в 1992 г. на базе СКБ «Механобр») выпускает флотационные пневмомеханические машины типа



РИФ с коническими аэраторами и камерами вместимостью 3,2; 6,3; 8,5; 16; 25; 45 м^3 , а также чановые пневмомеханические машины с камерами вместимостью 30, 45, 65, 85, 100 и 130 м^3 с расположенным по оси камеры коническим отбойником пены (рис. 3).

Более 800 камер РИФ внедрены в промышленность. Они успешно эксплуатируются на обога-

тельных фабриках Учалинского, Лениногорского, Зырянского ГОКов, Восточно-Казахстанского МХК, на комбинатах «Эрдэнэт», «Печенганикель» и других. Фирма осуществляет постоянный поиск новых решений, позволяющих повысить эффективность флотационного процесса, в частности, флотации крупных частиц (пат. РФ №2213624).

В МГОУ за последние 15 лет под руководством Н.Ф. Мещерякова были созданы и внедрены на обогатительных фабриках, перерабатывающих сильвинитовые руды и руды цветных металлов, низкоэнергетические механические и пневмомеханические флотационные машины РИФ-16МО (патент РФ №2174050), ФМО-6,3 (патент №2025397), ОКМ-16, ФПМО-16, ОКМ-3 с импеллерами осевого типа. Машины потребляют на 24–50% меньше электроэнергии, чем эталонные (рис. 4). Их преимущество — изменение характера течения жидкости с осевого на радиально-осевой, благодаря чему ликвидируется неаэрированная зона у дна камеры и обеспечиваются взвешивание и флотация крупных частиц. Испытания таких машин на сильвинитовой фабрике подтвердили предпочтительность их применения для флотации крупных классов минералов. Между тем, проведенный автором анализ результатов опробования показал, что в машинах данного типа мелкие частицы сильвина извлекаются несколько хуже, чем в машинах ФКМ-6,3 (с кипящим слоем) конструкции ГИГХСа, выпускаемых Днепропетровским заводом горно-шахтного оборудования с 1971 г. Машины ФКМ-6,3 по-прежнему широко распространены в калийной промышленности и успешно работают на восьми калийных фабриках России и Белоруссии.

Из отечественных производителей флотомашин можно отметить еще Новосибирский завод «Труд», выпускающий малогабаритные (вместимость камеры до $1,2 \text{ м}^3$) многокамерные механические флотома-

шины ФМР-02, ФМР-10, преимущественно для перечисленных операций, а также камеры ФМ-04 и ФМ-1,2, отличающиеся отсутствием статора и хорошей вертикальной циркуляцией пульпы.

Среди механических машин за рубежом наибольшее распространение получили машины «Wemko 1+1», ранее известные под торговой маркой «Фагергрэн». Фирма Wemko традиционно выпускает многокамерные машины 12 типоразмеров с камерами вместимостью до 85 м^3 и многокамерные вместимостью 127 м^3 прямоугольного сечения. Все камеры соответствуют условиям геометрического подобия, а также многим собственным технологическим критериям масштабного перехода. Монокамерную машину особенно широко применяют для обогащения углей, в меньшей степени — для руд, и рекомендуют для флотации материала

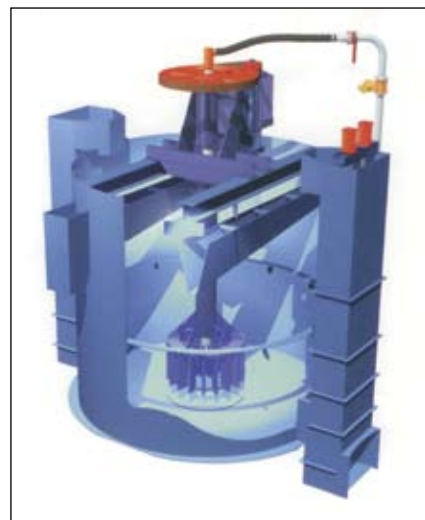


Рис. 7. Флотомашина RCS (Reactor Cell System) на основе аэрационного узла DV (Deep Vane — «Глубокая лопасть», Metso Minerals)

крупностью 40% класса — $0,074 \text{ мм}$ при плотности пульпы не более 37% твердого. Для флотации крупнозернистых пульп в камере устанавливают большой импеллер, статор оснащают дополнительным цилиндром с отверстиями меньшего диаметра, изменяют число оборотов. Фирма выпускает также флотационные машины в закрытом исполнении, предназначенные для флотации в среде азота.

Приверженность механическому способу аэрирования фирма сохранила и при создании в 2002 г. новой серии флотационных машин цилиндрического типа Wemko SmartCell с камерами вместимостью от $0,05$ до 257 м^3 , которые имеют механический аэрационный механизм машины «Wemko 1+1» и коническое ложное днище. В настоящее время большинство новых фабрик в Чили практически полно-

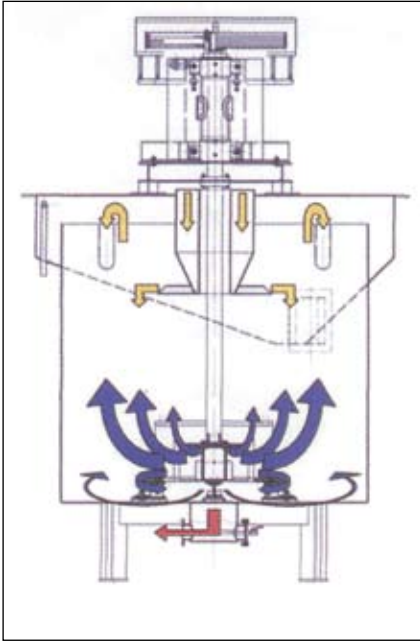


Рис. 8. Флотомашинa IF-20RC, Институт цветных металлов в г. Гливице (Польша)

стью, за исключением очистных стадий, в которых применяют колонные машины, оснащены машинами «Вемко» с камерами вместимостью 130–160 м³. Например, на медной фабрике Laguna Sesa в основной флотации установлены машины с камерами цилиндрической формы (160 м³) диаметром 6,8 и высотой 4,4 м. Камеры вместимостью 250 м³ находятся в стадии завершения испытаний.

В настоящее время самыми востребованными в мире можно назвать пневмомеханические флотомашины компании Outokumpu Technology (Outotec). Фирма производит ряд флотационных машин: ОК-У (U-образная камера) вместимостью 8, 16, 38, 50 м³; ОК-Р (камера прямоугольной формы) вместимостью 0,05; 1,5; 3 и 5 м³. Кроме

того, фирма создает большеобъемные импеллерные машины чанового типа Tank Cell (ТС): машины ТС с камерами вместимостью 5, 10, 20, 30, 50, 70, 100 и 130 м³ и машины ТС-XHD с камерами 100, 160, 200 и 300 м³. Первые 80 машин ТС-100 были поставлены для флотации меди на комбинат Minera Escondida в Чили еще 10 лет назад.

Исследования фирмы направлены в основном на разработку оптимальных вариантов конструкции аэрационного узла с целью извлечения частиц различной крупности. Рабочие характеристики машины выбирают, исходя из требований к пенному продукту. При этом в камере создается глубокий пенный слой, как в колонных машинах, с тем, чтобы наряду с извлечением обеспечить высокое качество концентрата. Специалисты фирмы предлагают для достижения технологического эффекта флотировать частицы оптимальной крупности и мелкие частицы с помощью механизма MultiMix при обычной или повышенной рабочей скорости импеллера, а флотацию крупных частиц проводить с использованием механизма Free Flow при несколько меньшей рабочей скорости. Расход энергии на перемешивание в этом случае снижается с 0,7 до 0,55 кВт/м³.

В последние годы в компании Outokumpu для песковой флотации разработаны установки SkimAir с камерами вместимостью 0,3; 1,3; 2,2; 8; 23; 49; 120 м³ (рис. 6). В цилиндрической камере по ее оси вершиной вниз установлен конус, создающий относительно узкое пространство по периметру камеры для съема пены и обеспечивающий всплывание аэрофлокул крупных частиц. Камерный продукт разгружается по центру в нижней конической части камеры. Для обеспечения высокого извлечения крупных частиц и улучшения качества концентрата в цикле измельчения к ней подключают перемешивающую установку TankCell (технология названа Flash Roughing).

Широкое распространение в последние 10 лет имеют большеобъемные пневмомеханические флотомашины RCS финской компании Metso Minerals, основанной в 2001 г. в результате объединения компаний Svedala (Швеция) и Nordberg (Финляндия). Фирмой Svedala (организована при слиянии американской Denver Equipment и шведской Sala International) создана пневмомеханическая флотомашинa RCS (Reactor Cell System) на основе аэрационного узла DV (Deep Vane — «Глубокая лопасть»), которая поставляется с 1997 г (рис. 7).

Камера машин RCS представляет собой цилиндри-

ческий чан, высота которого для машин RCS-200 достигает 9,4 м при диаметре 7 м. Конструкция аэрационного узла обеспечивает мощную радиальную циркуляцию пульпы к стенкам камеры и интенсивные обратные потоки к нижней стороне ротора, что позволяет избежать запесочивания флотомашин. При этом создается циркуляция пульпы и в верхнюю часть камеры, в отличие от производимой ранее стандартной машинy Sala AS, что позволяет эффективно извлекать крупные частицы.

Машины RCS применяют при обогащении медных, свинцово-цинковых, платиновых и других руд на более чем тридцати объектах в различных странах. Предлагается 12 типоразмеров машин RCS с камерами вместимостью 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 130, 160, 200 м³. Ведутся работы по дальнейшему увеличению размера камеры. Для флотации крупных частиц фирма продолжает выпускать пневмомеханическую машинy Denver DR с камерой вместимостью 42 м³.

Следует отметить целенаправленные, для определенных операций флотации и характеристик пульпы, разработки Институт цветных металлов в г. Гливице (Польша) пневмомеханических флотомашин серии IF, отличительной чертой которых является применение аэраторов нового типа, позволяющих работать в широком диапазоне аэрации пульпы при малых окружных скоростях ротора. Флотомашины с цилиндрической камерой и плоским дном вместимостью от 9 до 57 м³ имеют семь модификаций, различающихся системами подачи питания и сбора пенного продукта при регулируемых условиях аэрирования.

Для основной флотации руд цветных металлов, содержащих минералы с высокой плотностью, для условий широкого диапазона содержания твердого в пульпе разработаны флотомашины IF-30R и IF-57R. Пульпа подается и выходит с боков в нижней части камеры.

Для быстрой флотации крупных частиц из пульп с большой концентрацией твердого созданы камеры IF-9S и IF-19S. Подача питания в них осуществляется над аэратором через конус, установленный срезанной вершиной вниз по оси камеры, который является одновременно пеноотбойником. Камерный продукт разгружается снизу по центру камеры. Эти машины чаще всего применяют в межцикловой флотации как одиночные камеры.

Для перемешивающей флотации руд цветных металлов с высоким содержанием полезного компонента и соответственно с большим выходом пенного продукта (уголь, графит, сера) разработаны флотомашины IF-20RC (рис. 8), IF-30RC и IF-45W, отличительной чертой которых является противочасовое



Рис. 9. Флотомашины ТС-40 Outotec (Outokumpu Technology). Суздальское месторождение, АО ФИК «АЛЕЛ», Казахстан

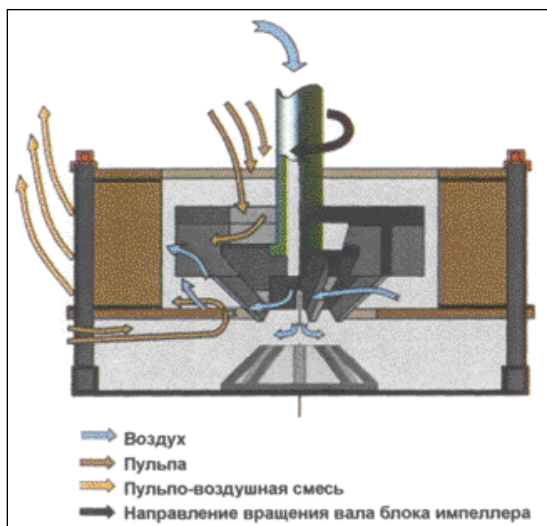


Рис. 10. Аэрационный узел РИФ

течение пульпы через флотационную камеру. Подачу питания осуществляют сверху по центру камеры на определенном расстоянии от аэратора.

Принципиальным конструктивным отличием импеллерных машин является устройство аэрационного блока. При этом конструкции импеллеров в пневмомеханических машинах разнообразнее, чем в механических, что обусловлено отсутствием необходимости засасывать воздух из атмосферы.

Анализ патентной литературы свидетельствует о сотнях различных решений, связанных с конструкцией импеллерного блока. Большинство современных флотомашин оснащают импеллерами лопастного типа, среди которых можно выделить две группы. К первой относятся импеллеры, схематично представляющие собой диск с радиально расположенными на его верхней и нижней сторонах (или с одной стороны) невысокими вертикальными пластинами, прямыми или изогнутыми. Ко второй группе — импеллеры, представляющие собой вертикальные или наклонные пластины, примыкающие к ступице («Вемко», «Гум-

больдт Ведаг», «Оутокумпу», «Дорр-Оливер», «Экер», «Бут», «Максвелл»). Основным отличием лопастных импеллеров является форма лопаток, разнообразие которых характерно для импеллеров второй группы. Применяют также пальцевые импеллеры с радиальным статором, например, в машинах «Аджитейр» (США) и др., отличающиеся эффективным диспергированием воздуха.

У большинства флотационных машин роторно-статорный блок располагается в камере флотации, преимущественно у дна. Это характерно для машин «Дорр-Оливер», «Оутокумпу», «Метсо», «Механобр», «РИВС» и многих других. Реже ротор располагается сверху, как у машины Вемко, или посередине — для машин фирмы FFE Minerals USA Inc. Во всех указанных машинах реализуется принцип обязательной циркуляции всей пульпы через импеллер.

Вместе с тем существенным моментом является наличие верхней циркуляции. Она способствует дополнительному выносу минерализованных пузырьков и позволяет поддерживать оптимальное распределение твердого по объему камеры, что обеспечивает снижение расхода энергии.

НПО «РИВС» разрабатывает аэрационные узлы новой конструкции, включающие импеллер, статор и подимпеллерный конус, позволяющие перемешивать с наименьшими энергозатратами минеральные частицы крупностью до 3 мм за счет рифленной поверхности конической части импеллера и создания торового вихревого потока в нижней зоне камеры (рис. 10). Вертикальная циркуляция пульпы создается с помощью горизонтального лопастного колеса, установленного в верхней части импеллера.

Освоено производство аэрационных узлов из резинотехнического материала (РИФ-3, РИФ-5, РИФ-6, РИФ-7, РИФ-9, РИФ-11, РИФ-13) для пневмомеханических флото-

машин с камерами вместимостью 1,2; 1,6; 3,2; 6,3; 8,5; 16; 40; 100 и 130 м³. Аэраторы РИФ механически полностью совместимы со всеми типами блоков вышеуказанных флотомашин и могут быть успешно использованы при реконструкции существующего на обогатительных фабриках парка флотомашин.

Сравнение технологических результатов испытания аэрационных узлов ОК-38, ОК-50 и РИФ на комбинатах «Печенганикель» и «Ковдорский ГОК» показали заметные преимущества аэраторов РИФ перед аэраторами ОК. На основании полученных результатов на этих предприятиях была проведена модернизация машин ОК-38 и ОК-50 с установкой в них аэрационных узлов РИФ.

Аэратор оригинальной конструкции разработан в ОАО «ПО Усольмаш» для пневмомеханической машины ФПМ-16УМ, поставленной на Гайский ГОК (рис. 11). Конусовидный лопастной импеллер, установленный на полом вала, содержит вторую ступень, которая представляет собой концентрическое кольцо, размещенное внизу (у вершины конуса), с закрепленными на нем радиальными лопатками, что позволяет эффективно поддерживать суспензию во взвешенном состоянии. Для обеспечения необходимой циркуляции пульпы разработаны импеллеры различного строения, изменяющие структуру и динамику потоков вверх и у дна камеры (пат. РФ 209688, 2225263, 2225264, 2255814).

Наиболее эффективное решение связано с созданием низкоэнергоемких импеллеров осевого типа в виде пропеллерной или турбинной мешалки с наклонными лопастями различной формы (см. рис. 4). Создаваемые мешалкой в циркуляционном стакане аэрированные потоки пульпы ударяются о дно камеры, превращаются в восходящие и выносят флотационные комплексы в пену. Наибольший эффект возникает при использовании лопастей параболического профиля (пат. РФ №2174050) в машине РИФ-16МО, что позволяет снизить потребляемую мощность на 10–14% и за счет перехода к механической системе подачи воздуха — еще на 16–18% при степени аэрации до 1 м³/(мин·м²).

Аэрационные блоки с осевыми импеллерами могут быть установлены в механических и пневмомеханических флотомашинах любого типа с камерой глубиной до 2,5 м и вместимостью до 30 м³. При этом за счет ликвидации воздуходувок можно снизить энергозатраты (до 30%) и эксплуатационные расходы.

Аэратор флотомашин «Вемко 1+1» имеет цилиндрический лопастной ротор увеличенной высоты (см. рис. 5 и 9в), что исключает заиливание дна камеры. Симметрич-

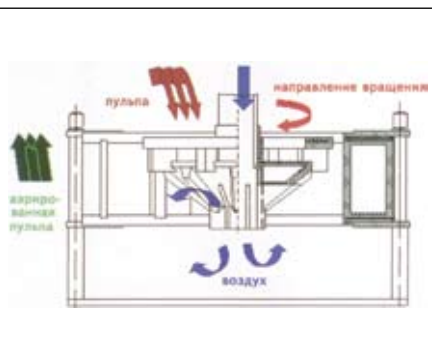


Рис. 11. Импеллер и статор флотомашин ФПМ-16УМ из полиуретана

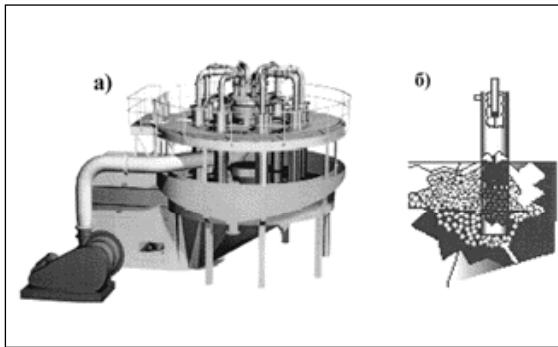


Рис. 12. Общий вид колонной флотомашины Джеймсона (а) и её аэрационной камеры (трубы) (б).

ная конструкция ротора позволяет менять направление вращения и переворачивать его в вертикальной плоскости, что обеспечивает увеличение срока эксплуатации ротора до 5 лет. Трапецеидальные утолщения на концах его лопастей способствуют образованию турбулентности, обеспечивающей повышение эффективности минерализации и снижение скорости радиального потока. Пульвовоздушная смесь из полости ротора выбрасывается через отверстия статора в радиальном направлении, что способствует равномерному распределению пузырьков воздуха по объему камеры. Статор цилиндрической формы с отверстиями закрывает только нижнюю половину импеллера. К верхнему концу статора прикреплен конический успокоитель (внешний статор), собранный из перфорированных пластин, которые поднимаются под действием потока пульпы. Нижний конец импеллера углублен в циркуляционную трубу, установленную на придонной плите, из под которой засасывается пульпа. Ротор и статор изготовлены целиком из резины.

Аэрационный узел DV, разработанный для флотомашин RCS, состоит из конического ротора, смонтированного на полом валу, и статора. Ротор имеет вертикальные лопасти с нижними гранями специальной формы и дисперсионную полку. Воздух подается в пульпу через полый вал и вертикальные отверстия ротора и диспергируется, ударяясь о неподвижные лопасти статора.

Интересное решение использовано в новой флотационной машине, разработанной в Беларуси (г. Могилев). В качестве диспергатора воздуха применяется пружинный импеллер в виде изогнутой винтовой спирали при наложении виброколебаний малой амплитуды и высокой частоты. Одновременно он используется как пружинная мельница в камере. Такие аппараты требуют дальнейшей доработки и могут быть опробованы, например, для шламуемых руд, требующих последовательного вскрытия полезного компонента.

В последнее время разработчики флотомашин стали больше уделять внимания организации удаления пенного продукта с целью повышения скорости флотации. В зависимости от строения пены и скорости флотации изменяют конфигурацию и расположение пенных желобов. Флотационные машины, имеющие цилиндрическую камеру, оснащают обычно кольцевым желобом, но в машинах большего размера к ним добавляют радиальные желоба (IF-20RC, IF-30RC, Wemco Smart Cell) или по оси камеры устанавливают пере-

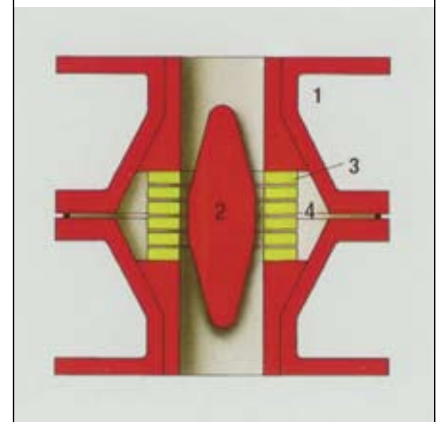
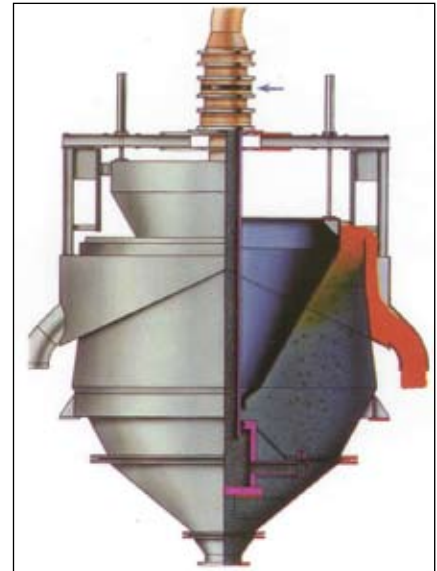
мещаемый вертикально отражатель пены в виде конуса вершиной вниз, а также дополнительный внутренний кольцевой желоб (OK, TC-XHD). В цилиндрической камере машины RCS с целью скорейшего удаления пены установлены два поперечных желоба. Изменяют способ удаления пены и в машинах с прямоугольной камерой. Во флотомашине ФПМ-16УМ нового поколения взамен пеногонов и боковых навесных желобов для слива пенного продукта установлены поперечные встроенные желоба с регулируемым положением порога слива. В последнее время для повышения качества концентрата стали использовать орошение пенного слоя водой как в колонных машинах.

Пневматические флотационные машины

Разработка и промышленное применение пневматических флотационных машин колонного типа в настоящее время является одним из основных направлений развития флотационной техники и технологии. Только в России за последние 10 лет выдано более 80 патентов на конструкции пневматических колонных машин и аэраторов к ним. Например, в Бразилии на железорудных фабриках, введенных в эксплуатацию с 1990 г. и применяющих флотацию, во всех операциях используют колонные машины. Также широко они используются на железорудных предприятиях Канады, США, Индии.

Для колонных машин характерен рост извлечения за счет лучшей флотации тон-

Рис. 13. Пневматическая флотационная машина Pneufлот
а – общий вид машины, б – общий вид аэратора, в – внутреннее устройство аэратора с «наддувом»
1 – корпус из пропилена
2 – шайба, регулирующая зазор (8–12 мм)
3 – газоподающее устройство, состоящее из сопел диаметром 25–100 мкм



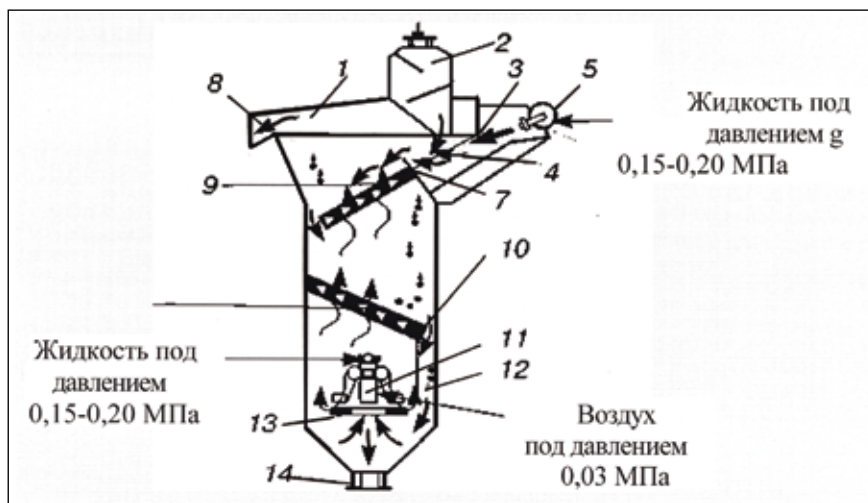


Рис. 14. Опытно-промышленный образец флотационной колонны ФП-6, ЗС

1 – колонна, 2 – питатель, 3 – рассеиватель, 4 – решетка, 5 – струйный аэратор, 6 – насадка, 7 – пластина, 8 – пенный порог, 9 – верхняя решетка, 10 – нижняя решетка, 11 – глубокий аэратор, 12 – разгрузочный карман, 13 – рассеивающее кольцо

ких частиц, а также повышенное качество концентрата в связи с уменьшением механического выноса в пену пустой породы и орошением пенного слоя водой. В мировой практике за последнее время накоплен значительный опыт разработки и применения колонных аппаратов. Однако при широком их внедрении проявились некоторые проблемы, такие, как необходимость оптимизации высоты камеры флотации, создания эффективного аэрационного узла, обеспечивающего получение пузырьков оптимальной крупности, их минерализацию и селективное выделение образцованных комплексов.

Большая высота колонны (по отношению к ее диаметру) является принципиальным конструктивным отличием колонных флотомашин, хотя некоторые колонные аппараты, чаще называемые чановыми машинами, имеют сопоставимые высоту и диаметр. Вопрос оптимального соотношения высоты и диаметра флотационного колонного аппарата, во многом зависящий от метода диспергирования воздуха и аэрирования пульпы, решается в каждом случае по-разному.

Эффективная высота колонны определяется назначением аппарата и связана со свойствами перерабатываемой руды и особенностями операции флотации. В настоящее время не установлен универсальный критерий выбора высоты колонны для всех случаев флотации.

Для колонных флотационных машин, разработанных в нашей стране, наиболее характерна высота 4–7 м, для канадских и американских машин — 10–16 м, однако для окисленных свинцово-цинковых руд оптимальная высота оказалась равной 4,5 м, а для флотации угля фирма «Control International Inc.» использует флотоканеры высотой до 20 м при диаметре 4 м. Флотационные колонны, производимые в Китае, диаметром от 0,6 до 4 м, имеют высоту от 5 до 9 м в зависимости от операции флотации. Однако известны примеры применения колонн и других

размеров. Например, чановые машины серии ФП института «Гинцветмет» имеют высоту от 3,7 до 12 (16) м при вместимости до 220 м³.

Форма сечения камеры пневматических флотационных аппаратов в основном круглая, реже — прямоугольная. Для флотомашин, разработанных в Китае, квадратное сечение является типичным. Много машин прямоугольного сечения разработано в Канаде (2×8, 3×6 или 4×6 м).

Колонны сечением более 0,5–0,8 м², как прямоугольные, так и цилиндрические, разделяют вертикальными перегородками на сообщающиеся отсеки для устранения крупномасштабных вихревых потоков, а также для создания противоточно-прямоточного движения пульпы с целью увеличения зоны минерализации (без изменения высоты колонны). Ряд многосекционных флотационных аппаратов был разработан в ИОТТ (Институт Обогащения Твердого Топлива) под руководством Ю. Б. Рубинштейна.

Подача питания в колонный аппарат осуществляется с применением разнообразных устройств и сводится в основном к следующим вариантам: в верхнюю часть по центру или по периметру колонны — при противоточном движении; в нижнюю часть — при прямоточном; одновременная подача сверху и снизу. Подача питания сверху является основным решением для колонн с пневматическим аэрированием. При этом скорость нисходящего движения пульпы выбирают таким образом, чтобы исключить унос тонкодисперсных пузырьков и в то же время обеспечить требуемую производительность аппарата. На практике скорость нисходящего потока в различных колонных аппаратах колеблется, в зависимости от вида сырья и операции флотации, в интервале 0,5–3,7 см/с.

Высокие скорости нисходящего потока (3–3,7 см/с) устанавливают при флотации относительно крупными пузырьками воздуха (2–4 мм). Малые скорости нисходяще-

го потока пульпы (0,5–1 см/с) создают, как правило, при флотации тонкодисперсных продуктов мелкими пузырьками.

При подаче питания снизу содержание воздуха в камере флотации в 1,5–2 раза ниже, чем при подаче сверху, что связано с меньшим временем пребывания пузырьков в колонне, однако при этом увеличивается время пребывания в ней твердой фазы, что особенно актуально при флотации крупных частиц. Совмещение подачи в верхнюю и нижнюю части колонны целесообразно при флотации частиц широкого диапазона крупности.

Для повышения качества пенного продукта в подавляющем большинстве колонных аппаратов применяют орошение пенного слоя водой, что позволяет уменьшить механический вынос шламов на 40–60%. Расход промывной воды составляет от 10 до 200 л/мин на 1 м² площади пенного слоя.

Эффективность работы пневматических флотационных машин зависит в первую очередь от надежности и результативности способа диспергирования воздуха и устройства для его реализации.

Диспергирование в пневматических флотационных машинах осуществляется в основном тремя способами:

- пневматическим — продавливанием газа через погруженные в пульпу пористые элементы;
- гидравлическим — захватом газовой фазы поверхностью струй жидкости;
- газоструйным (газлифтным), при котором струи воздуха в жидкости, поднимаясь в ограниченном пространстве, увлекают жидкость, перемешиваются с ней и диспергируются на мелкие пузырьки.

Процессы аэрирования пульпы и сепарации могут быть совмещены в одной камере или осуществляться отдельно. Применяют также и смешанный вариант.

Самым простым способом аэрирования пульпы в промышленных пневматических флотационных аппаратах является пневматический — продавливание газа через отверстия диспергатора. Наиболее распространенные аэрационные устройства такого типа — перфорированные трубки из резины, металла, полиэтилена, ткани, войлока и других материалов, пластины, диски, в которые под давлением подают воздух. Такие аэраторы часто располага-

ют в нижней зоне колонны в качестве дополнительных, в сочетании с другими способами аэрирования. Они обеспечивают равномерно-мерность аэрации по объему аппарата и оптимальный для осуществления коалесцентного механизма флотации состав пузырьков. Для предотвращения закупорки аэраторов и достижения оптимальной дисперсности газовой фазы давление подаваемого воздуха периодически изменяют (пат. РФ №2059443). Часто применяют эластичные диспергаторы. Например, в колонных аппаратах типоразмеров от ФП-1,2ЦМ до ФП-63ЦМ института Механообр установлен аэратор в виде каркаса, покрытого эластичной тканью на основе спандекса. Срок его службы — от 6 до 18 мес.

Общим недостатком пневматических аэраторов является их быстрый износ и сложность получения большого числа мелких пузырьков, необходимых для эффективной флотации шламов. Срок службы диспергаторов воздуха, как с жесткими, так и с эластичными порами составляет несколько месяцев. Совершенствование этих аэраторов идет по пути изыскания новых износостойких материалов.

Среди машин с пневматическим аэратором следует особо отметить колонные аппараты для флотации крупнозернистых пульп, в первую очередь машины пенной сепарации, отличающиеся подачей пульпы на пену, которые используются, например, при флотации крупных алмазов (~2 мм). Для зернистых пульп применяют также колонны, дополнительно снабженные несколькими импеллерами на вертикальном валу с целью поддержания пульпы во взвешенном состоянии. Такие машины производят некоторые фирмы США («Прокем Миксинг Экуимпент», «Хайдрокем», «Вемко»). Комбинированные аппараты сочетают преимущества колонных пневматических и импеллерных машин и способны обогащать руды широкого диапазона крупности, в том числе сульфидные.

При флотации тонких частиц все большее распространение получают гидравлические способы аэрирования. Они дают возможность получать пузырьки меньшей крупности, чем при использовании пневматических аэраторов.

Наиболее наглядным примером гидравлического диспергирования воздуха можно считать струйные аэраторы — поверхностные и погружные, — в которых аэрирование происходит при внедрении под давлением струй жидкости определенной конфигурации сквозь поверхность пульпы. В поверхностных аэраторах водовоздушная смесь погружается в обрабатываемую жидкость со скоростью 10–15 м/с при напоре 50–70 кПа, что обеспечивает захват оптимального количества воздуха. Для уменьшения размера пузырьков тонкие струи воды подают со скоростью более 50 м/с (процесс Fastflot). Более результативны погружные

струйные аэраторы, которые подают струю воды при напоре до 200 кПа в воздушный колокол в придонной части флотомашин на дополнительную перегородку или в днище камеры.

Высокую эффективность струйного аэрирования демонстрирует завоевавшая популярность колонная флотомашина, которую разработал исследователь из Австралии G. J. Jameson. Минерализованные пузырьки образуются в специальной вертикальной трубе (аэрационной камере) при подаче в нее под давлением пульпы с реагентами в виде свободной струи, которая подсаживает воздух через отверстие в боковой стенке трубы (рис. 126).

Нижним концом труба опущена в цилиндрическую камеру флотации. Уже при первых испытаниях такой камеры было установлено, что в ней значительно сокращается время флотации. Так, в цикле пересортировки цинкового концентрата на фабрике Маунт Айза (Австралия) оно составило 3–11 с при аэрации в трубе высотой ~1 м и диаметром ~0,1 м. За 20 лет развития этого направления флотации число

одновременно используемых аэрационных узлов в одной камере флотации возросло уже до 16. Аппараты такого типа наиболее эффективно применяют при обогащении угля и минералов малой плотности, а также используют при флотации руд цветных металлов.

Аналогичный способ гидравлического аэрирования в реакторе с вертикальной трубой и последующей флотации в отдельной камере разработан в МИСиС (пат. РФ 2275968).

В связи с появлением износостойких материалов все большее распространение за рубежом и в нашей стране получают аэраторы пневмогидравлического (инжекторного) типа различных модификаций, которые применяют в современных колонных машинах СРТ, CISA, Pneufлот и других.

Компания CETCO (США) поставляет в настоящее время разработанные канадской компанией СРТ (Canadian Process Technologies Ins.) колонные флотомшины квадратного или круглого сечения диаметром до 5 м и высотой 8–16 м с аэраторами SlamJet для флотации различных руд. Пневмогидравлические аэраторы SlamJet, называемые воздушными, отличаются от аэраторов других типов тем, что в них установлен игольчатый клапан, соединенный с мембранным датчиком, и в случае внезапного прекращения подачи воздуха выходное отверстие автоматически перекрывается, чтобы предотвратить попадание твердых частиц в систему аэрации. Диспергаторы размещают снаружи колонны по ее периметру. Аэраторы служат более трех лет, удобны в обслуживании, их можно извлекать из колонны для замены форсунок

без остановки оборудования. В последнее время на фирме разработан новый эффективный диспергатор кавитационного типа. Аэраторы типа SlamJet разрабатывали и другие фирмы.

Компанией СРТ во многих странах установлено более 350 колонн для флотации различного минерального сырья, в том числе и угля. В последние годы фирма «Сетка» внедрила колонны в России при обогащении апатитовых (ОАО «Апатит» — аппараты Comipco диаметром 4,6 м и высотой 8 м для пересортных операций), железных (доводка магнетитового концентрата на Михайловском ГОКе) и медно-никелевых руд.

В настоящее время в мире довольно широко применяют аналогичные аппаратам СРТ колонные машины подразделения финской компании Metso Minerals — фирмы CISA, которая с середины 1980х годов поставила по всему миру более 100 колонных аппаратов.

Первые аппараты были оснащены пористыми диспергаторами, а затем — водовоздушными (USBM) — в виде трубок с нижними отверстиями и износостойкими насадками в них. В дальнейшем их заменили диспергаторами SlamJet, однако это не дало ожидаемых технологических результатов. В 1993 г. фирма CISA приступила к производству диспергаторов Microsel™, которые позволили улучшить технологические показатели флотации. Аэратор Microsel представляет собой трубчатый статический смеситель, в котором воздух и жидкость смешиваются в условиях больших градиентов скоростей потоков. Далее пульповоздушная смесь проходит через лопасти, закрепленные стационарно внутри смесителя, при этом воздух распадается на мелкие пузырьки размером 0,4–1,2 мм и вводится во флотационную колонну. Примером эффективного применения диспергаторов CISA служит использование пяти колонных флотомашин диаметром 4 м и высотой 12 м на обогатительной фабрике Miduk (Иран) в секции основной медной флотации производительностью



Рис. 15. Машина серии КФМ, «Уралмеханообр» (патенты РФ №2132749, №2151648, №219074)

650 т/ч. В операции сразу получают готовый медный концентрат.

Фирма KXD Humboldt Wedag (Германия) производит пневматические флотокамеры Pneufлот с гидравлическим аэратором (рис. 13). Камера имеет цилиндрическую форму, в центре которой установлен конический пеноотбойник. Внешний аэратор — самовсасывающий либо с «наддувом» от воздухоудвки или компрессора — установлен над камерой по ее оси. Он выполнен в виде цилиндра из полипропилена 1 (рис. 12в), в нем по оси располагается шайба 2, регулирующая внутренний кольцевой зазор для прохода пульпы. На внутренней стенке цилиндра установлено газоподающее устройство в виде кольцевых керамических шайб 3, состоящее из очень узких сопел диаметром 25–100 мкм, либо состоящее из диафрагмы с отверстиями. Предварительно насыщенная воздухом и обработанная реагентами пульпа прокачивается через аэратор со скоростью 6–10 м/с. Ширина кольцевого канала в области аэрации — 10–12 мм. Для увеличения пропускной способности параллельно подключают несколько аэраторов. Аэраторы с «наддувом» применяют преимущественно в том случае, если плотность питания выше 2 т/м³. Срок службы аэратора составляет более 2 лет.

После аэрирования пульпа выходит из отверстий кольца распределителя, расположенного в нижней части камеры флотации, и поступает в камеру со скоростью 5–10 м/с, в зависимости от крупности и плотности минеральных частиц. Пенный слой разгружается в кольцеобразный желоб по периметру камеры. Время пребывания пульпы в камере флотации составляет от 2 до 4 мин.

Флотационные камеры Pneufлот имеют диаметр от 0,8 до 5 м, производи-

тельность 5–1000 м³/ч при вместимости от 0,5 до 53 м³ и диаметре аэратора от 40 до 700 мм. Их применяют преимущественно при флотации углей и горнохимического сырья, в меньшей степени — при флотации руд цветных металлов. С 1987 г. в эксплуатации находится более 70 аппаратов, в том числе на нескольких угольных фабриках России и Украины. Они обеспечивают повышение извлечения, качества концентрата, а также скорости флотации (в 4 раза). Максимальная крупность флотируемых частиц для угля составляет 500–750 мкм.

В последние два года фирма внедрила колонны Pneufлот на нескольких предприятиях по обогащению фосфорных, калийных, медных, платиновых, полевошпатовых и баритовых руд, что говорит о повышении спроса на эти флотационные аппараты.

Следует заметить, что колонные аппараты подобные Pneufлот, под названием Imhoflot в последнее время начала производить фирма «Maelgwyn Mineral Services» (Великобритания).

Фирма Humboldt Wedag разрабатывает новую конструкцию самовсасывающего аэратора с целью применения одного и того же аэратора для различной производительности по воздуху за счет изменения способа его подачи. Следует отметить, что совершенствование аэраторов, эжектирующих воздух из атмосферы, является актуальным вопросом, направленным на отказ от принудительной энергоемкой подачи воздуха от воздухоудвки или компрессора при гидравлическом методе аэрирования, и в настоящее время это направление развивают многие исследователи.

Газоструйные аэраторы применяют в большеобъемных колонных (чановых) машинах ФП, разработанных в институте Гинцветмет (С.И. Черных). Аэратор представляет собой смеситель, состоящий из соосно-

расположенных труб различного диаметра, внутренняя из которых перфорирована. В колонне возможна установка нескольких диспергаторов. Газоструйный аэратор может эффективно эксплуатироваться в высоких колоннах вместимостью до нескольких сотен кубометров. Внедрение газлифтных аэраторов вместо трубчатых в большеобъемных машинах ФП-40, ФП-80, ФП-100 на Жирекенской, Миргалимсайской, Кентауской и других обогатительных фабриках позволило сократить расход электроэнергии на 0,35

кВт·ч/т руды. Срок службы таких аэраторов составляет 2,5 года.

Направление разработки большеобъемных флотомашин колонного или чанового типа с газлифтным аэратором можно считать перспективным для переработки большого количества минерального сырья в операциях основной и контрольной флотации. Вместе с тем они не обеспечивают требуемую селективность разделения при флотации тонкодисперсных продуктов, особенно в перечистных операциях.

В России увеличилось число разработок, направленных на создание машин с гидравлическим методом аэрирования. Следует отметить разработанные в МГОУ колонные машины для крупнозернистых материалов с установленными в камере в два яруса наклонными беспробальными решетками для периодического взвешивания скользящего по ним сверху вниз слоя минералов (рис. 14). В колонне реализованы условия минерализации воздушных пузырьков в пенном, кипящем и периодически взвешиваемом слоях. Колонная флотомашин ФП-6,3С со струйными аэраторами (поверхностным — в зоне подачи питания — и глубинным) дает возможность при крупности питания сильвиновой флотации –3+0,8 мм и производительности 12 т/(ч·м³) получать высококачественный по содержанию КС концентрат основной флотации при извлечении 96%. Высокое извлечение было достигнуто также при флотации алмазов крупностью –2 мм.

Гидравлическое аэрирование в верхней части совместно с пневматическим в нижней части колонны применяют и в машинах серии КФМ — КФМ-600 (2,2 м³), КФМ-1400 (22 м³), КФМ-2500 (56 м³), разработанных в ОАО «Уралмеханобр» (патенты РФ №2132749, №2151648, №219074). Машина КФМ-1400 высотой 10 м была внедрена при флотации сульфидных руд на обогатительных фабриках Урала (Турьинский рудник, Сафьяновское и Волковское месторождения и др.) и в корпорации «Казахмыс» (рис. 15).

Применение машин КФМ позволяет повысить качество концентратов и извлечение ценного компонента, а также снизить число операций флотации и затраты электроэнергии. Однако в дальнейшем была проведена модернизация флотомашин серии КФМ, предусматривающая снижение высоты аппарата до 5,5–6 м, увеличение площади пенообразования и длины разгрузочного порога. Это позволило почти вдвое поднять удельную производительность флотомашин и повысить извлечение меди, как от операции (на 23,65%), так и по схеме обогащения в целом (на 1,0%). В последнее время на фирме взамен пневматических аэра-

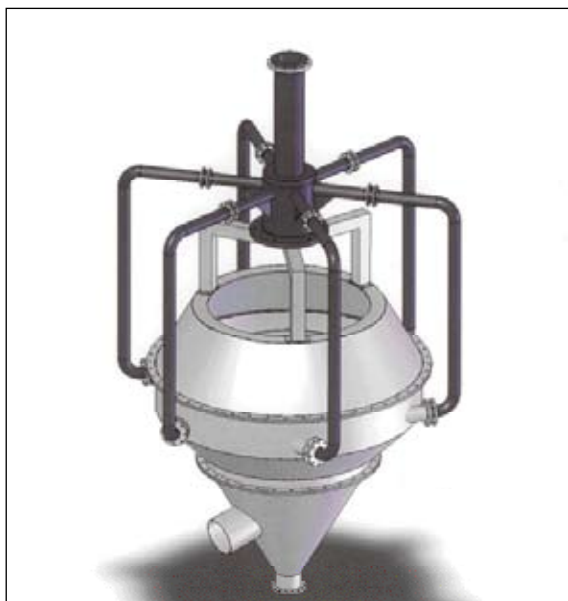


Рис. 16. Внешний вид центробежной флотомашин Imhoflot

торов используются аэролифтные диспергаторы и рассматриваются вопросы создания большеобъемных (120 м^3) чановых машин.

В ИрГТУ (Иркутский государственный технический университет) разработаны флотационные колонны ФАНД с гидравлическим аэрированием и минерализацией в нисходящем по вертикальной трубе потоке пульпы, который дополнительно аэрируется на выходе из трубы в средней зоне колонной камеры разделения, а также в зоне выхода камерного продукта в нижней ее части. Флотационные колонны были внедрены при переработке тонковкрапленных серебродержащих руд Дукацкого ГОКа, боросиликатных руд ОАО «ГХК Бор», угольной пены на ОАО «БрАЗ» и ОАО «ИрАЗ» и других видов сырья.

При создании новых флотационных аппаратов применяются также различные способы воздействия на процесс минерализации: пульсирующую подачу воздуха или жидкости; тангенциальный ввод пульпы во флотационный аппарат; сочетание тангенциального ввода пульпы с подачей диспергированного воздуха в гидроциклон; центробежную флотацию (например, пат. РФ №2248849, №2183998); наложение колебаний различной частоты, включая ультразвуковые. Однако большинство этих способов еще не совершенны в техническом исполнении и пока не находят широкого применения.

Из развивающихся направлений следует отметить разработанную Dr.-Ing. Rainer Imhof из Германии пневматическую центробежную флотомашину Imhoflot, в которой предварительно аэрированный в вертикальной трубе поток флотационной пульпы вводится в камеру разделения тангенциально в нескольких точках (рис. 16). Это способствует сокращению времени флотации (до 30 сек.) и повышению качества концентрата. Созданы флотационные камеры диаметром 6,5, 1,7 и 2,2 м. Обнадеживающие результаты получены в Германии на аппарате диаметром 1,7 м с производительностью $150 \text{ м}^3/\text{час}$, установленном на перечищении концентрата калийных солей. Флотокамера размером 2,2 м работает на опытной установке по переработке тонких частиц угля в Южной Африке.

В 1980-х годах в ИПКОН РАН (Институт проблем комплексного освоения недр Российской Академии Наук) Г.Д.Красновым предложен новый способ флотации в вертикально колеблющейся среде и соответствующий аппарат, в котором сочетаются элементы пневматического и механического диспергирования (а. с. СССР №№ 1407561, 1484374). Аппарат следует отнести к пневматическим, так как в нем нет движущихся частей. Флотация происходит в среде, совершающей низкочастотные ($0,3 - 1 \text{ Гц}$) вертикальные колебания, а диспергирование воздуха осуществляется с помощью непод-

вижного пульсационного аэратора за счет пульсирующей подачи в него воздуха, который одновременно сообщает колебания жидкости в камере флотации.

Созданы флотационные пневмопульсационные машины серии ФПП вместимостью от $0,1$ до 21 м^3 испытаны в различных операциях при флотации фосфоритов, углей, полиметаллических и медно-никелевых руд, а также калийных солей в ОАО «Уралкалий», где в промышленной эксплуатации при флотации силвина и глинисто-карбонатных шламов находятся аппараты вместимостью 14 и 21 м^3 с автоматизированным управлением (пат. РФ 2070839). Они обеспечивают одновременное повышение извлечения ценного компонента и качества продуктов при удельной производительности до $25 - 30 \text{ м}^3$ пульпы на 1 м^3 объема камеры, значительное снижение энергетических затрат (до 30%) и расхода реагентов, сокращение числа стадий флотации.

Устройство и принцип действия машин ФПП позволяет эффективно проводить флотацию минералов различного химического и гранулометрического составов в одних и тех же аппаратах, что достигается за счет оперативного изменения дисперсности воздушных пузырьков и условий взаимодействия флотационных фаз путем изменения амплитудно-частотного режима колебаний. Наибольший эффект может быть достигнут в операциях перичистой флотации.

При разработке конструкций новых и модернизации используемых флотационных машин стали значительно больше уделять внимания автоматическому управлению их работой и удобству обслуживания. Практически все современные машины построены по модульному принципу, позволяющему создавать гибкую компоновочную схему флотации. Флотомшины оборудуют обычно системами управления расходом флотационного воздуха и уровнем пульпы. Стабилизацию уровня в камерных машинах осуществляют обычно путем воздействия на пробковые затворы промежуточных или хвостовых карманов. Колонные флотомшины, кроме того, имеют систему управления расходом воды для промывки пенного слоя. Могут быть также установлены индикаторы скорости съема и толщины пены, последняя составляет обычно $0,5 - 1 \text{ м}$.

Особое место в системах управления технологическим процессом занимает развиваемое в последнее время в зарубежной практике направление «технического зрения». Можно отметить разработанную компанией Metso Minerals систему VisioFrot, обеспечивающую контроль таких параметров пенного слоя, как скорость его движения, размер и распределение пузырьков на его поверхности и стабильность схода пенного продукта, степень минерализованности пузырьков,

цветовые характеристики и текстуру пенного слоя и др. (до 44 параметров), что позволяет использовать их для построения алгоритмов автоматического управления технологическим процессом.

Сегодня в мире эксплуатируется свыше 500 систем VisioFrot на более чем 20 фабриках. Применение этой системы на фабрике Laguna Seca (Чили) при флотации меди, как показали результаты испытаний 2003 г., способствовало повышению извлечения металла на 1,5%.

Заключение

Проведенный обзор работ по созданию новой флотационной техники позволяет констатировать, что конструирование идет по пути создания большеобъемных флотационных машин и повышения удельной производительности аппаратов, уменьшения энергоемкости, упрощения конструкций и осуществления оптимальной аэрации. Опыт показывает, что увеличение единичной мощности флотационного оборудования снижает удельные затраты. В мире уже работают флотационные колонны вместимостью 300 м^3 , создают машины с камерами вместимостью 500 м^3 .

Развитие пневматических флотационных колонных машин является по-прежнему ведущим направлением совершенствования флотационного оборудования. Повсеместно расширяется использование пневматических машин. Их применение, как правило, приводит к повышению селективности, извлечения, удельной производительности и снижению энергетических затрат.

Продолжается совершенствование механических и пневмомеханических машин. Проблема состоит в том, как в большом объеме обеспечить достаточную и равномерную аэрацию, оптимальные условия минерализации, создать спокойную зону подъема пузырьков, предотвратить оседание крупных частиц. Это объясняет большое разнообразие конструкций импеллерного узла, конфигураций флотационной камеры.

Развитие пневматической флотации идет по пути совершенствования аэрационных систем. Не прекращается поиск новых пористых материалов для пневматических диспергаторов и износостойких насадок для гидравлических аэраторов. Перспективным является струйное и пневмогидравлическое аэрирование в отдельной трубе-аэраторе в условиях больших скоростей взаимодействия потоков пульпы и воздуха. Близким к этому можно считать пневмопульсационный метод аэрирования, при котором насыщение пульпы воздухом происходит также в отдельной зоне, а флотация в пульсирующей среде открывает новые возможности для управления элементарным актом флотации.